

# 基于价值最优的区域能源管控中心价值模型研究

周逢权, 张萌, 甄立敬, 鞠洪新

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对区域能源互联中分布式发电方、电网运维方、用能负荷方以及区域能源管控中心的行政主管部门之间的利益协调现状, 深入剖析了区域能源管控中心源、网、荷的内涵及互动耦合关系, 提出区域能源管控中心的三层价值驱动体系, 并分层构建其价值模型。同时, 在保障电力系统物理网架结构安全稳定运行的基础上, 兼顾参与区域能源管控中心建设及运营各方的利益关系, 引入特殊的价值因子, 建立区域能源管控中心立体价值模型, 来综合兼顾各方的价值利益。最后通过案例分析, 进一步阐述了所提出的价值模型驱动的能源管控中心三层立体体系的合理性与可行性。

**关键词:** 能源管控中心; 源网荷; 三层驱动体系; 价值模型

## Value model study of regional energy management and control center based on value optimization

ZHOU Fengquan, ZHANG Meng, ZHEN Lijing, JU Hongxin

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** According to the present situation of interest coordination among distributed generation power producers, grid operators, power consumers and administrative service division of regional energy management and control center in the energy internet, the meaning and the interactive features among source, grid and load are analyzed deeply. Moreover, a three levels driving architecture driven by value of regional energy management and control center is proposed and several value models are built hierarchically. Besides, based on the stable and secure operation of power system with physical grid structure, this paper also builds an optimum value model along with particular value factors which balances the interest of all the participants. Furthermore, the case study of the established optimum value model also shows the rationality and feasibility of the three levels driving architecture.

**Key words:** energy management & control center; source, grid and load; three levels driving architecture; value model

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)22-0029-06

## 0 引言

智能电网是在传统电力系统的基础上, 通过集成新能源、新材料、新设备和先进传感技术、信息技术、控制技术、储能技术等新技术, 形成的新一代电力系统。发展智能电网是发展能源互联网的基础<sup>[1]</sup>。近年来, 智能配电网领域发展迅速, 智能配电终端和配电自动化系统在国内广泛推广, 保证了配电领域的供电可靠性<sup>[2-3]</sup>。随着分布式电源及各类柔性负荷的大量接入, 配电网结构及其运行特性也发生了较大转变<sup>[4-5]</sup>。传统配电网没有针对分布式电源并入配电网运行的完整调控方案, 配电网控制层尚未制定相关的需求侧响应激励措施, 没有与用户侧形成双向互动的需求响应机制等问题的解决日

益迫切<sup>[6-7]</sup>。同时, 仅以满足功率平衡为目标的调度方式不能满足新形势的需要, 难以充分考虑各类系统安全经济运行的影响因素<sup>[8]</sup>。如何稳定、合理地调控配电网中的资源、推进需求侧响应的落实已经成为建设智能配电网的重要目标<sup>[9-10]</sup>。

因此, 需要提出一种综合考虑经济效益、碳排放、电网物理约束以及奖惩补贴等因素的价值模型来调控区域电网内的各参与方。本文在综合考虑区域电网中源、网、荷互动关系的基础上, 剖析了区域能源管控中心中的源、网、荷的内涵, 提出了区域能源管控中心的三层驱动体系。同时针对参与价值博弈的不同利益角色构建了各自的最优价值模型, 通过引入价值因子, 最终建立了可由决策层来协调的区域能源管控中心立体价值模型, 并通过案

例分析,验证了价值模型驱动的能源管控中心三层立体体系的合理性与可行性。

## 1 区域能源管控中心的构成

本文探讨的区域能源管控中心为 110 kV 及以下电压等级的区域电网,其包含的各类电力能源,如新能源发电、生物质发电、冷热电三联供等;非电力能源,如供热、地热采暖等,可采用等价折算的方式,统一用电量来度量,这样便于建立包括整个区域的能源管控模型。区域能源管控中心的参与方包含发电方、运维方以及用能负荷方。由于大量分布式电源的接入,使得区域电网中的电力流更加多变<sup>[1]</sup>,为了实现电力流的合理分布,本文提出了包含物理层、利益层、决策层的三层驱动体系,其结构如图 1 所示。



图 1 区域能源管控中心三层驱动体系示意图

Fig. 1 Three levels driving architecture of energy management & control center

区域能源管控中心的物理层是由电源、电网、负荷组成的发、输、变、配、用电力系统网络,各类发电、电网及用电设备的安全稳定运行,是对区域电网实施能源管控的基础。利益层包含了物理层所涉及各参与方,如发电投资方、运维投资方以及用能负荷方等,各参与方从自身利益角度出发,为追求自身利益最大化而调整发、用电计划及网络运行参数。决策层为区域能源中心的监管层,应为非利益方,一般由政府的监管机构构成,其主要考虑社会的综合因素,通过配置价值因子等控制手段来引导价值流走向,平衡各参与方的利益关系。

## 2 区域能源管控中心价值模型

### 2.1 物理层模型

区域能源管控中心三层驱动体系中的物理层包含种类繁多的设备,它们均应遵循自身的物理规律运行,是区域能源管控中心稳定运行的基础。明晰

物理层中源、网、荷的控制分类及物理规律是建立价值模型的基础。

电源根据其一次能源形式可分为两类:利用不可再生能源发电的可控电源和利用可再生能源发电的不完全可控电源。典型的可控电源包括微型燃气轮机、燃料电池等;典型的不完全可控电源如风力发电机、光伏发电系统等。

可靠的网架结构和稳定的电网运行模式是区域电网安全运行以及源-网-荷友好互动的基础,其运营价值主要受配电网内网损的影响。

用电负荷分为柔性负荷和刚性负荷两类,刚性负荷的用电时间及用电量与电价基本无关,如军政机关用电、医院用电等;柔性负荷对电价敏感,在一定的用电周期内总用电量稳定,可以灵活地转移用电行为,在系统紧急情况时,可被削减或中断,如工厂用电、居民洗衣用电等。

物理层中的约束条件如下。

1) 区域电网功率平衡。

$$P_a + P_b + P_c + P_d - P_e + P_s = 0 \quad (1)$$

式中:  $P_a$  为可控电源的发电功率;  $P_b$  为不可控电源的发电功率;  $P_c$  为刚性复合的用电功率;  $P_d$  为柔性负荷的用电功率;  $P_e$  为区域电网内的网损;  $P_s$  为储能放电功率,当储能充电时,  $P_s$  为负值。

2) 为保证区域电网的供电稳定可靠,减小分布式电源波动性、随机性等特点的影响,需要限制系统内的可再生能源渗透率。

$$0 \leq \frac{P_a}{P_a + P_b} \times 100\% \leq \alpha \quad (2)$$

3) 从设备安全、寿命角度出发,为保证系统中发电设备的安全运行与设备寿命,应尽量减小对设备的冲击,避免设备反复、频繁调节的情况。

$$P_{\text{down}}(i) \leq P_a(i) \leq P_{\text{up}}(i) \quad (3)$$

$$0 \leq P_b(i) \leq P_{\text{max}}(i) \quad (4)$$

$$-\beta \leq \frac{P_a^t(i) + P_a^{t-1}(i)}{P_a^{t-1}(i)} \times 100\% \leq \beta \quad (5)$$

式(3)为可控机组的出力约束,  $P_{\text{down}}(i)$  和  $P_{\text{up}}(i)$  分别为发电机组  $i$  的有功出力上下限;式(4)为不可控机组的出力约束,  $P_{\text{max}}(i)$  为新能源发电机组  $i$  的最大有功出力;式(5)为可控机组的爬坡约束,  $P_a^t(i)$ 、 $P_a^{t-1}(i)$  分别为  $t$  时刻和  $t-1$  时刻该发电机组的有功出力。

4) 蓄电池运行约束。

$$-P_{\text{max}}(i) \leq P_s(i) \leq P_{\text{max}}(i) \quad (6)$$

式(6)为蓄电池出力限制,  $P_{\max}(i)$  为其最大放电功率,  $-P_{\max}(i)$  为其最大充电功率。

$$\begin{cases} -SoC_{\min} \leq SoC(i) \leq SoC_{\max} \\ SoC(t+1) = SoC(i) - P'_{BS} \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为蓄电池容量限制,  $SoC_{\max}$  和  $SoC_{\min}$  分别为蓄电池的剩余容量上下限;  $SoC(t+1)$  为储能在  $t+1$  时刻的容量。

## 2.2 利益层模型

(1) 发电方追求发电收益最大。

新能源发电的价值主要体现在新能源发电收益、环境价值、新能源发电成本与辅助服务成本的差值。

$$\begin{aligned} V_1 = & C_F P_a P_{tar} t + \frac{\sum_{i=1}^n V_i G_i}{365 \cdot 24} t - \\ & \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} C_a + C_{OMC} + C_{FIN} t - \\ & \left[ S_R P_c t + \sum_{i=1}^n \beta(\Delta P_i) P_i \Delta P_i \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中:  $C_F$  为新能源电站容量系数;  $P_a$  为新能源电站额定装机容量;  $P_{tar}$  为新能源电量上网电价;  $C_a$  为新能源机组购置费用;  $C_{OMC}$  为新能源机组运行维护成本;  $C_{FIN}$  为新能源项目财务成本;  $S_R$  为新能源电量并网后增加的备用容量;  $P_c$  为旋转备用电价;  $\beta(\Delta P_i)$  为备用容量的电量成本,  $\Delta P_i$  为新能源并网后负荷增加量;  $V_i$  为第  $i$  项污染物的环境价值标准;  $G_i$  为第  $i$  项污染物的排放量。

传统发电的价值主要体现在传统发电上网收益与环境成本、新能源发电成本之间的差值。

$$\begin{aligned} V_2 = & C_{F1} P_b P_{tar1} t - \sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n M_i - \\ & \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} C_{a1} + C_{OMC1} + C_{FIN1} t \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中:  $C_{F1}$  为传统发电电站容量系数;  $P_b$  为新能源电站额定装机容量;  $P_{tar1}$  为传统发电电量上网电价;  $C_{a1}$  为传统发电机组购置费用;  $C_{OMC1}$  为传统发电机组运行维护成本;  $C_{FIN1}$  为传统发电项目财务成本;  $E_i$  为第  $i$  项排污设备的投资额;  $M_i$  为第  $i$  项排污设备的年运行维护费用。

发电方价值模型为

$$f_1 = V_1 + V_2 \quad (10)$$

(2) 运维方应尽可能提高电量成交量, 减小网内线损, 确保运维成本最低。运维方的价值主要体现在

在送电价值与建设成本、维修费用的差值。

$$\begin{aligned} f_2 = & (P_{tar2} - P_{tar}) P_a t + (P_{tar2} - P_{tar1}) P_b t - \\ & \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} C_{a2} + C_{OMC2} + C_{FIN2} t \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中:  $P_{tar2}$  为电量下网电价;  $P_{tar}$  为新能源电量上网电价;  $P_{tar1}$  为传统发电电量上网电价;  $C_{a2}$  为运营商架设输电线路费用;  $C_{OMC2}$  为运营商输电维护成本;  $C_{FIN2}$  为运营商项目财务成本。

(3) 用能负荷方为各类负荷用户, 追求用电灵活性高, 用电费用最小。用户方用电的价值主要体现在其用电费用。

$$f_3 = (P_c + P_d) P_{tar2} t \quad (12)$$

式(12)中:  $P_{tar2}$  为电量下网电价;  $P_c$  为柔性负荷用电功率;  $P_d$  为刚性负荷用电功率。

## 2.3 决策层模型

决策层为区域能源管控中心的监管层, 作为非利益方, 担当着重要的社会责任。行政主管部门在兼顾社会性和经济性的基础上, 通过配置价值因子等控制手段来引导价值流走向, 平衡各参与方的利益关系。价值因子的确定从以下三个角度出发:

(1) 可再生能源利用角度

为构建环境友好型能源管控中心, 应尽可能增大可再生能源利用率, 充分发挥可再生能源的环保效益。

(2) 减少环境污染角度

传统发电设备采用煤炭、石油等传统化石能源, 不仅成本逐年增高, 其燃烧后输出的二氧化碳对环境产生的负面影响更是逐年加剧。

(3) 推动互动机制角度

为了推广需求侧响应机制, 鼓励负荷积极响应调度的控制策略。

决策层主导价值最优的目标函数为

$$y = \gamma_1 Maxf_1 + \gamma_2 Maxf_2 + \gamma_3 Maxf_3 \quad (13)$$

式(13)中,  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  为决策层主导对各个利益层中的参与方给予的价值因子。该模型能够在保证利益层价值的同时, 以尽量小的运行成本实现较好的环境效益, 实现区域价值最优, 为决策机构、发电方、运维方和用能负荷方提供了指导。

## 2.4 求解最优价值模型的算法设计

### 2.4.1 采用改进粒子群优化算法

粒子群算法(PSO)作为一种基于群体智能理论的随机优化算法已广泛应用于最优值的求解。为了提高 PSO 算法的局部寻优能力和加快收敛速度, 目前提出了多种 PSO 改进方法, 例如带有惯性权

重的粒子群改进算法、遗传算法与粒子群算法结合的方法、改进动量粒子群优化算法等，但是都具有收敛速度慢、精度低的缺点。本文针对粒子群算法易出现“早熟收敛”且区域管控中心价值最优模型问题需要处理的约束条件较多等问题，采用细菌觅食算法对粒子群算法<sup>[12-13]</sup>进行改进。改进粒子群算法的速度和位置更新公式为

$$v_{ij} = wv_{ij} + c_1 \cdot \text{rand}(pbest_{ij} - p_{ij}) + c_2 \cdot \text{rand}(pbest_j - p_{ij}) + c_3 \cdot \text{rand}(fwr_{ij} - p_{ij}) \quad (14)$$

$$p_{ij} = p_{ij} + C(i)u_{ij} \quad (15)$$

$$fwr_{ij} = \begin{cases} pbest_{ij} + \text{random}(|pbest_j - pbest_{ij}|), & pbest_j \neq pbest_{ij} \\ p_j^{\min} + \text{random}(p_j^{\max} - p_j^{\min}), & pbest_j = pbest_{ij} \end{cases} \quad (16)$$

$$C(i) = \frac{\sum_{k=1}^{\xi} |Error_{i,k}| + 1}{\sqrt{Iteration}} \quad (17)$$

式(17)中, 1 的加入是为了避免误差总和为零时算法停滞;  $Iteration$  为迭代次数;  $\overline{u_{ij}}$ 、 $\|V_i\|$  为  $v_{ij}$  的单位向量和模长。

$$\overline{u_{ij}} = \frac{v_{ij}}{\|V_i\|} = \frac{v_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N v_{ij}^2}} \quad (18)$$

式中:  $j$  为第  $i$  个粒子的维数;  $V$  为粒子总维数;  $fwr_{ij}$  为第  $i$  个粒子觅食随机步长位置的第  $j$  维坐标;  $p_{ij}$ 、 $v_{ij}$  分别为第  $i$  个粒子的位置和速度的第  $j$  维坐标;  $pbest_{ij}$ 、 $pbest_j$  分别为第  $i$  个粒子个体最优解的第  $j$  维坐标和全局最优解的第  $j$  维坐标;  $C(i)$  为觅食随机步长;  $\xi$  为约束条件个数;  $Error_{i,k}$  为第  $i$  个粒子第  $k$  个约束条件的误差值, 由所有约束条件的误差量总和与当前迭代次数共同决定。对于等式约束, 误差量取等式左右两边的差值, 对于不等式约束, 误差量取偏离约束条件上限或下限的差值。

在标准粒子群算法中, 若  $pbest = pbest_i = p_i$  且  $p_i$  是一个局部最小值点, 那么下一代中粒子的速度将不会变化, 算法需进行多次迭代才能跳出局部最小。本文提出的改进粒子群算法可以很快跳出局部最小值点, 同时因速度更新时受约束于多个向量, 减小了标准粒子群算法在求解多维、多约束优化问题时的随机性; 式(14)、式(16)保证了算法在迭代初期误差较大时的全局寻优能力和在迭代后期误差较小时的精细搜索能力。

## 2.4.2 算法的具体实现

本文采用改进粒子群算法求得区域能源管控中心价值模型的最优解, 其算法流程如图 2 所示。

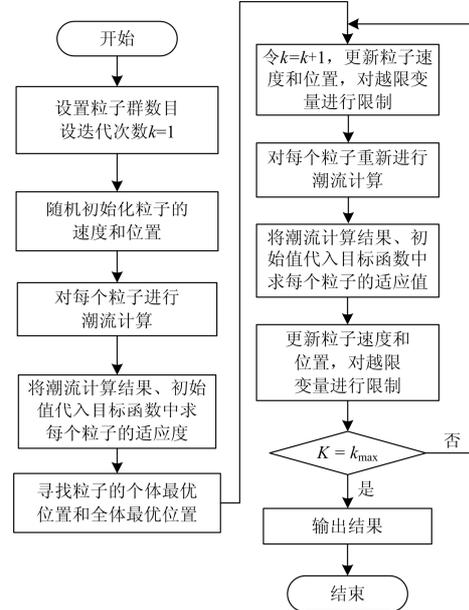


图 2 改进粒子群优化算法流程图

Fig. 2 Process of the improved particle swarm optimization algorithm

## 3 案例分析

本文以某学校区域能源管控中心示范工程为例, 动态管控周期为 1 天, 分为 24 个时段。该学校区域内能源管控范围包括单台风力机、光伏电池阵列、两台微型燃气轮机(MT)、1 台燃料电池(FC)和铅酸蓄电池, 供电负荷为 1 栋行政办公楼、1 栋综合实验楼、4 栋公共教学楼、食堂及 8 栋 6 层宿舍楼, 总用电负荷为 600 kW。各发电单元污染物治理费用及排污系数见文献[14]。

燃料、铅酸蓄电池参数:  $P_{\max}^{\text{ess}} = 40 \text{ kW}$ , 荷电状态:  $SoC(0) = 100 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,  $SoC_{\min} = 40 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,  $SoC_{\max} = 160 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。单台风力机的参数如下:  $p_{b1} = 100 \text{ kW}$ , 光伏参数如下:  $p_{b2} = 120 \text{ kW}$ 。

可控发电单元主要参数如表 1 所示。

表 1 可控机组的主要参数

| Table 1 Main parameters of controlled unit |           |              |              |      |               |
|--|-----------|--------------|--------------|------|---------------|
| 类型   | 功率上/下限/kW | 安装成本/(万元/kW) | 维护费用/(万元/kW) | 效率   | 爬坡速率/(kW/min) |
| MT1  | 10~100    | 1.600        | 0.088        | 0.3  | 1.0           |
| MT2  | 15~200    | 1.306        | 0.128        | 0.45 | 1.5           |
| FC   | 10~100    | 4.275        | 0.029        | 0.40 | 1.0           |

区域能源管控中心接线示意图如图 3 所示。

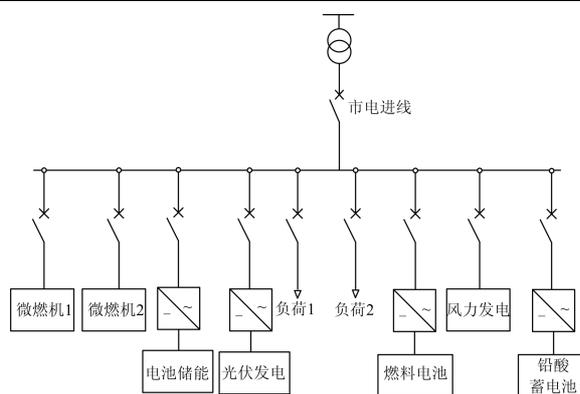


图 3 示范工程主接线图

Fig. 3 Main wiring graph of demonstration project

本文采用改进粒子群算法, 图 4 显示的是改进粒子群算法优化前后的粒子多样性。从图中可以看出, 优化后的粒子多样性明显增多, 解决了基本粒子群算法易陷入局部最优和易早熟的缺点。

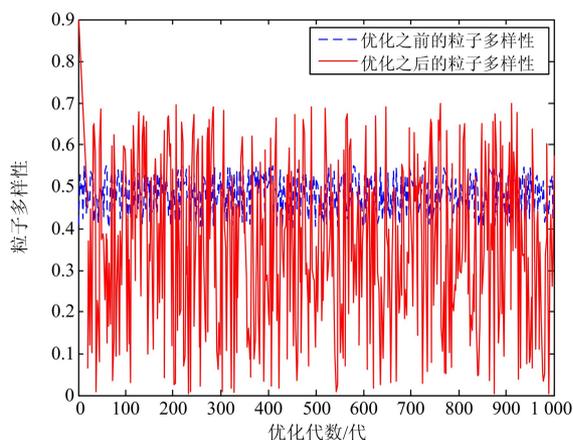


图 4 优化前后的粒子多样性

Fig. 4 Diversity contrast particles before and after optimization

部分仿真结果如表 2 所示。

表 2 部分时段各单元的功率

Table 2 Power of each unit

| 时间/<br>h | 风电/<br>kW | 光伏/<br>kW | 负荷/<br>kW | FC/<br>kW | MT1/<br>kW | MT2/<br>kW | 蓄电池/<br>kW |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 5        | 5.23      | 0.8       | 108.7     | 2.5       | 4.7        | 80.9       | -5.2       |
| 10       | 50.7      | 49.8      | 300.7     | 20.7      | 2.9        | 150.8      | -9.7       |
| 15       | 51.7      | 60.2      | 350.0     | 80.2      | 1.5        | 90.2       | -48.2      |
| 20       | 20.4      | 0         | 508.2     | 101.2     | 100.5      | 202.1      | 20.6       |
| 24       | 49.3      | 0         | 220.7     | 90.2      | 3.7        | 102.4      | -50.5      |

仿真结果如图 5 所示。

仿真结果表明本文采用改进粒子群算法能够求解出能源管控中心价值模型最优时各个参与单元的功率, 为决策机构、发电方、运维方和用能负荷方

提供指导。同时, 验证了价值模型驱动的能源管控中心三层立体体系的合理性与可行性。

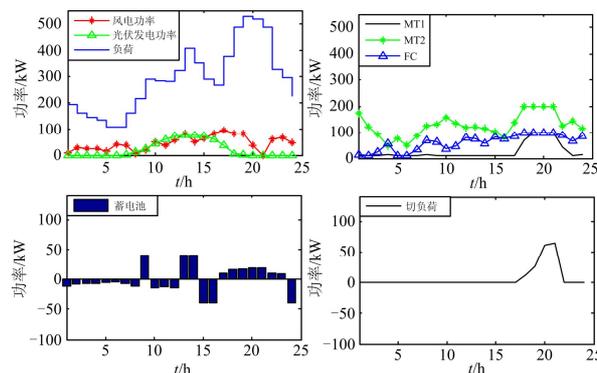


图 5 各个单元的功率

Fig. 5 Power of each unit

## 4 总结

能源互联网建设蓬勃发展, 为区域能源管控中心建设提供了全新的参考模式, 在区域能源管控中心中, 分布式发电方、网络运维方、用户方以及行政主管部门之间形成了极深的利益耦合关系, 本文深入剖析了区域配电网中源、网、荷的内涵及互动关系, 提出区域能源管控中心的三层驱动体系, 阐述了各层的控制目标以及各层之间的渗透性, 并分层构建其价值模型。在兼顾经济性和社会性的基础上引入价值因子, 建立区域能源管控中心综合价值模型, 使横向的网架控制和纵向的价值流能全面贯通, 以价值的杆杠, 来驱动能源管控中心建设。通过以某学校区域能源管控中心示范工程为例, 虚拟出各参与方, 优化各参与方的价值取向, 通过应用改进粒子群优化算法, 验证了以价值流来协调区域能源管控中心利益关系的合理性与可行性。

## 参考文献

- [1] 关于促进智能电网发展的指导意见[R]. 国家发展改革委、国家能源局, 2015.  
Guiding opinions on promoting the development of smart grid[R]. National Development and Reform Commission and National Energy Bureau, 2015.
- [2] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.  
WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [3] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动

- 运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-7.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid "source-grid-load" interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-7.
- [4] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.  
ZHANG Yongjun, REN Zhen, LI Bangfeng. Survey on optimal reactive power dispatch of power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56.
- [5] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.  
XIE Kai, LIU Yongqi, ZHU Zhizhong, et al. The vision of future smart grid[J]. Electric Power, 2008, 41(6): 19-22.
- [6] BASU A K, BHATTACHARYA A, CHOWDHURY S, et al. Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based micro-grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 30-38.
- [7] 艾欣, 许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.  
AI Xin, XU Jiajia. Study on the microgrid and distribution network co-operation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149.
- [8] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 计及需求侧响应的微网综合资源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2621-2628.  
ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Integrated resources planning in microgrid based on modeling demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2621-2628.
- [9] 梁旭明, 陈国平, 娄殿强, 等. 面向智能电网的跨区直流输电集控化运维体系[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 1-7.  
LIANG Xuming, CHEN Guoping, LOU Dianqiang, et al. A smart grid oriented architecture of operation and maintenance system based on centralized controlling and monitoring for inter-area HVDC power transmission project[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 1-7.
- [10] 张洋, 李强, 李朝晖, 等. 光伏-储能联合微网系统工程方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 212-214.  
ZHANG Yang, LI Qiang, LI Zhaohui, et al. Conceptual design for the project of microgrid system interconnected with photovoltaic generation & energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 212-214.
- [11] DE JONGHE C, HOBBS B F, BELMANS R. Optimal generation mix with short-term demand response and wind penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 830-839.
- [12] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.  
GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 524-536.
- [13] 刘欢, 刘志刚. 基于改进粒子群算法的牵引变电所维修优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 87-94.  
LIU Huan, LIU Zhigang. An improved particle swarm algorithm study on optimization model of maintenance schedules for railway traction substations[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 87-94.
- [14] 白峪豪. 含分布式电源的微电网经济调度模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
BAI Yuhao. Research on micro-grid economic dispatch model with distributed power sources embedded[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

---

收稿日期: 2015-04-31; 修回日期: 2015-08-25

作者简介:

周逢权(1969-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为智能电网应用技术; E-mail: zhoufengquan@xjgc.sgcc.com.cn

张萌(1987-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为微电网及分布式发电技术; E-mail: zhangmeng981@qq.com

甄立敬(1988-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为微电网及分布式发电技术。E-mail: zhenlijingchang@163.com

(编辑 魏小丽)